



Mitigación de pérdida de paquetes en una red LoRaWAN para aplicaciones sin línea de vista.

Alfonso Rafael Junior Osorio Jiménez

Universidad del Norte

División de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Barranquilla, Colombia

2019

Mitigación de pérdida de paquetes en una red LoRaWAN para aplicaciones sin línea de vista.

Alfonso Rafael Junior Osorio Jiménez

Trabajo de investigación presentado para optar al título de:

Magister en Ingeniería Electrónica

Directora:

Mst., Ph.D., María Gabriela Calle

Línea de Investigación:

Redes Telemáticas

Grupo de investigación:

Telecomunicaciones y señales

Universidad del Norte

División de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Barranquilla, Colombia

2019

(Dedicatoria)

*A todas esas personas que me apoyaron,
a todos los que me dieron su mano
cuando lo necesité, a todos los que
estuvieron conmigo sin dejar de
alentarme y en especial a mis padres y
hermana por siempre apoyarme en cada
paso. Esto es por y para cada uno de
ustedes.*

*“En la vida te pueden quitar todo, menos
tu educación” - Gabriel N. Jiménez C.*

Resumen

LoRa es una tecnología que permite la transmisión de paquetes a distancias mayores de 10 km con bajo consumo de energía. Sin embargo, la cantidad de paquetes recibidos es muy baja cuando no hay condiciones de línea de vista. La presente tesis describe una solución para este tipo de situaciones para aplicaciones de largo alcance que necesiten mejorar la tasa de recepción de datos. Las pruebas fueron realizadas en un campus universitario donde cada uno de los nodos de la red se encontraba alejado de los demás, sin condiciones de línea de vista. Los resultados muestran que la red pasó de 0% de entrega de paquetes a un mínimo de 61% al implementar la solución propuesta.

Palabras clave: LoRaWAN, malla, protocolos de enrutamiento, árbol, LoRa, LPWANs, MACGSP6, gossip.

Abstract

LoRa is a technology to send packets through distances longer than 10 km with low power consumption. However, the amount of received packets decreases with non-line-of-sight conditions. This thesis presents a solution for packet losses due to this situation. This solution could be useful for applications that need to increase packet reception rate. The testbed was located at a university campus where each node did not have line of sight with other nodes in the network. Results show that the proposed solution increased packet delivery ratio from 0% to a minimum of 61%.

Keywords: LoRaWAN, grid, routing protocols, tree, LoRa, LPWANs, MACGSP6, gossip.

Contenido	Pág.
Introducción	11
Antecedentes	12
Justificación	13
Planteamiento del problema	14
Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
Alcances	15
Limitaciones	15
Marco Teórico y Estado del Arte	16
Marco Teórico LoRaWAN	16
Trabajos Relacionados	17
Enrutamiento entre GWs	18
Enrutamiento entre nodos	19
Protocolos tipo árbol	19
Protocolos tipo Malla	21
MACGSP6 (Medium Access Control for Gossip-based Sleep Protocol Version 6) [30].	23
Descripción de la solución	26
Algoritmo	27
Implementación	29
Pruebas y resultados	31
Pruebas preliminares	31
Prueba de enlace LoRaWAN	31
Pruebas de enlace punto a punto	34

Prueba de consumo de corriente	37
Pruebas de campo	43
Conclusiones y Recomendaciones	47

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Topología de estrella en estrellas en redes LoRaWAN: nodos 3 y 4 se conectan con distintos gateways.	11
Figura 2. Funcionamiento de nodos clase A [15].	16
Figura 3. Funcionamiento de nodos clase C [15].	17
Figura 4. Ciclo de trabajo de MACGSP6.	24
Figura 5. Representación gráfica cuando el nodo pasa al tiempo de quietud. En este ejemplo 1 QP = 10 GP.	25
Figura 6. Diagrama de flujo del protocolo MACGSP6 implementado en este proyecto.	28
Figura 7. Tarjeta de desarrollo Seeeduino LoRaWAN [32].	29
Figura 8. GW Seeeduino LoRaWAN [33]	30
Figura 9. Ubicación de los nodos.	34
Figura 10. Enlaces resultantes entre los nodos 1-6. Las líneas azules entre los nodos representan los enlaces normales. Las líneas negras representan enlaces buenos. La dirección de los enlaces se representa con una flecha que apunta al nodo destino. Los enlaces donde el PRR es igual a 0 (cero) no fueron tenidos en cuenta.	36
Figura 11. Prueba de consumo de corriente. Elementos utilizados: Fuente 4.83v, Osciloscopio, resistencia de 10 Ohm, nodo LoRa.	38
Figura 12. Ventanas de recepción y transmisión de MACGSP6 en LoRa. El círculo 1 representa a la recepción y el 2 a la transmisión. Las secciones I, II, III y IV representan 4 GPs diferentes. Donde se pueden ver dos ventanas recepción (secciones I y III) y dos de transmisión (secciones II y IV), una para transmitir el mensaje original, y la segunda para reenviarlo debido a que no se recibió el debido acuse en la sección III.	39
Figura 13. Tensión sobre la resistencia cuando el nodo entra en modo de sueño. El círculo 1 corresponde al espacio de descanso después de haber abierto las ventanas de recepción. El círculo 2 es el mismo espacio después de la ventana de transmisión. 3 y 4 muestran el QP.	40

Figura 14. Corriente del módulo RHF76-052 con LoRaWAN, clase A SF12 [38].

42

Figura 15. Mensaje a enviar. Cuenta con 3 partes: Contador de saltos, cuerpo de mensaje, número de secuencia (todos los valores se encuentran en hexadecimal).

44

Figura 16. Saltos realizados por cada uno de los mensajes recibidos en el GW.

46

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Resumen de los protocolos y artículos revisados en esta sección. La columna de Línea de vista hace referencia a la condición de la mayoría de los nodos del paper citado. (*): Protocolos no implementados en LoRa. HW: Hardware; SW: Simulación.	25
Tabla 2. Porcentaje de mensajes recibidos por enlace.	35
Tabla 3. RSS promedio por enlace en dBm con intervalos de confianza de 95%.	37
Tabla 4. Corrientes en diferentes modos para tecnologías de WSN (wireless sensors networks). Tomado de [39].	43
Tabla 5. Tabla resumen de resultados. promedio con intervalos de confianza de Bonferroni del 95%.	45

1.Introducción

LoRaWAN es un protocolo que está basado en la capa física de LoRa, el cual es un sistema de transmisión del largo alcance diseñado por Semtech y Lora Alliance [1]. LoRa pertenece a la rama de tecnologías denominada LPWAN (Low Power Wide Area Network), que forma parte del Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) [2]. Se espera que este tipo de tecnología se implemente para aplicaciones como monitoreo de infraestructura [3], de agua [4] y de temperatura [5].

LoRaWAN crea una topología de estrella de estrellas donde los nodos se conectan a uno o más gateways (GWs) por medio de un enlace LoRaWAN (inalámbrico) y estos últimos se conectan al servidor principal a través de Internet (Figura 1). El GW de LoRaWAN tiene la capacidad de conectar hasta 10.000 nodos hasta distancias de 15 km en áreas rurales y 5 km en zonas urbanas [6]. Aparte de esto, LoRaWAN cuenta con una característica denominada factor de dispersión (Spreading Factor, SF). El SF garantiza que un porcentaje alto de los paquetes enviados sean recibidos y que la transmisión no sea afectada por posibles señales interferentes [7].

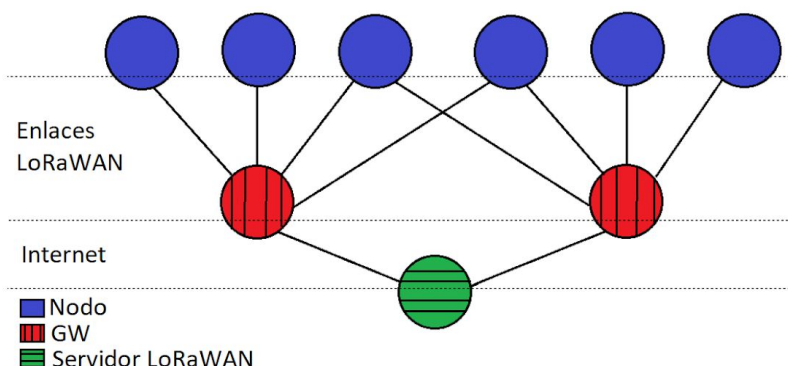


Figura 1. Topología de estrella en estrellas en redes LoRaWAN: nodos 3 y 4 se conectan con distintos gateways.

Estas características pueden aportar importantes avances en proyectos de IoT para recolección y transmisión de datos [1]. Sin embargo, dependiendo de la aplicación para la cual se implementa esta red, LoRa tiene ciertas limitaciones que pueden afectar su rendimiento. Uno de esos son los problemas de comunicación en ausencia de línea de vista [8],[9].

La presente tesis busca implementar un protocolo de enrutamiento para redes donde el enlace LoRaWAN sea débil o no exista debido a la falta de línea de vista. Las pruebas fueron implementadas dentro de un campus universitario en puntos donde la mayoría de los nodos no tienen enlace directo con el GW. El protocolo de enrutamiento implementado fue MACGSP6 (Medium Access Control for Gossip-based Sleep Protocol Version 6), debido a que presenta varias características similares a LoRaWAN: bajo consumo de energía y bajo procesamiento de datos para reenviar los mensajes, abriendo dos ventanas de recepción. Adicionalmente, la literatura revisada presenta diversas alternativas para enrutar en LoRa, las cuales serán mostradas más adelante en los trabajos relacionados. Sin embargo no se ha documentado la opción de protocolos basados en gossip, familia de protocolos a la cual pertenece MACGSP6.

El protocolo implementado logra que todos los nodos que originalmente no pueden comunicarse directamente con el GW, entreguen más del 60% de sus mensajes por medio de múltiples saltos, lo cual se traduce en retardo. Esto prueba los beneficios de usar esta opción para mitigar la pérdida de paquetes en redes LoRa con problemas de enlaces por falta de línea de vista.

1.1 Antecedentes

LoRaWAN puede ser utilizada en diversos casos de uso para el Internet de las Cosas (IoT), como monitoreo en ciudades inteligentes, en agricultura de precisión, monitoreo ambiental y otros. Sin embargo, la tecnología presenta algunas limitaciones que pueden generar pérdidas de información. En [8] la pérdida de paquetes más alta llega hasta 63%, debido a la falta de línea de vista. De igual forma, en [9] la pérdida de paquetes llega a 100% para varios enlaces que no tienen línea de vista entre el GW y los nodos. Esta situación sería un inconveniente para implementar LoRa en aplicaciones de movimiento o monitoreo en lugares donde no haya línea de vista directa con el GW y se requiera recibir de forma continua la información. Para este tipo de aplicaciones se han realizado varios estudios para disminuir la pérdida de paquetes por falta de línea de vista. Buscando una solución a este problema, en [10] proponen reenviar los mensajes hasta 3 veces si el acuse por parte del GW no es recibido. Sin embargo no se

muestran resultados de esta propuesta, y si el nodo no tiene línea de vista, es posible que nunca reciba el acuse del GW, por más que se reenvíe el mensaje.

Por otro lado, la tecnología LoRa está diseñada para topologías estrella de estrellas, por lo cual los paquetes realizan un solo salto desde los nodos hasta el GW. Sin embargo, en [9] se ejecutan pruebas con una topología donde se pueden presentar múltiples saltos. En este estudio se logró aumentar de manera considerable el número de paquetes recibidos en la mayoría de los casos donde no eran entregados en la topología original. Dicha prueba fue realizada dentro de un campus universitario a una distancia máxima de 800 metros, con un máximo de tres saltos en la red. Se trabajó con un total de 19 nodos, los cuales fueron ubicados en puntos sin línea de vista, unos más alejados del GW que otros. En total se usaron 19 nodos LoRa. Los resultados muestran mejoras considerables en el caso de varios nodos que inicialmente estaban afectados, pero hubo un nodo cuya tasa final de recepción de paquetes fue de 8.3% y otros dos de 65.6% y 69.7%, los cuales son valores menores al resto de los resultados.

Algunos estándares LPWAN como IEEE 802.15.4g y DASH7 pueden funcionar con topologías tipo malla o tipo árbol, al igual que otras tecnologías de sensores inalámbricos como ZigBee [11]. En otro estudio se comparó el consumo de energía de LoRaWAN y ZigBee con una red tipo malla. Como resultado se obtuvo que el consumo de la segunda red es mucho mayor que la primera [12]. Por otra parte, Ochoa et al. concluyen que una red LoRa con múltiples saltos puede extenderse para cubrir áreas más grandes con valores de SF más pequeños con menos consumo de energía que una red de estrella LoRaWAN [13].

1.2 Justificación

Para el desarrollo de la tesis se implementa una topología diferente a la original estrella de estrellas, con el fin de encontrar una solución a una de las principales limitaciones de LoRa, la pérdida de paquetes por falta de línea de vista. Este trabajo busca aprovechar las virtudes de la tecnología LoRa y proponer una opción para ambientes sin las mejores condiciones para transmitir directamente y que cuenten con la cercanía de otros nodos para poder reenviar la información.

La solución propuesta permite expandir las posibles aplicaciones de la tecnología LoRa en ambientes donde no se cuenta con línea de vista directa en el enlace de comunicaciones. Un ejemplo es la recolección de datos de medidores de servicios públicos tales como energía eléctrica, gas o agua, porque estos equipos pueden estar ubicados en áreas donde haya obstáculos entre el nodo transmisor

y el receptor. De igual manera, en el campo, bosques o selvas, se puede implementar la solución propuesta para mejorar el desempeño de la red colocando nodos repetidores, evitando de esta forma más gastos en infraestructura o equipos de mayor valor.

Por otro lado, este estudio expande el trabajo del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Señales en la línea de Redes Telemáticas, explorando LoRa, una tecnología bastante reciente, de grandes posibilidades de aplicación en el Internet de las Cosas.

1.3 Planteamiento del problema

Los dispositivos LoRaWAN tienen características como la transmisión a larga distancia y bajo consumo de energía. Algunos retos para LoRaWAN son las colisiones de paquetes por aumento en la cantidad de dispositivos en la red, interferencia de otras tecnologías, la transmisión en movimiento o efectos causados por falta de línea de vista [2],[8],[9],[14].

Dependiendo de la aplicación deseada, la pérdida de paquetes por estos factores puede ser importante. Dadas las posibilidades de uso de LoRa en IoT, se prevé que puede haber miles de dispositivos que podrían transmitir información usando esta tecnología. Sin embargo, la ubicación de dichos dispositivos puede darse en lugares donde no exista línea de vista entre los nodos y el GW.

Los nodos LoRa deben utilizar hardware (HW) simple, con el fin de transmitir paquetes de tamaño máximo de 250 Bytes [11], durante pocas veces al día, con tasas de transmisión máximas de 50 kbps [15]. Sin embargo, si estos paquetes se pierden, el estándar solamente utiliza acuses como medio para saber si la información llegó al GW o no. En el caso de que no reciba una confirmación del GW, el nodo reenviará el mensaje una sola vez [15]. Si los paquetes no llegan, se perderán de manera definitiva.

Por otro lado, LoRaWAN no incluye algoritmos de enrutamiento en el estándar de comunicaciones. Por esto, la información que se pierda porque un nodo no tiene línea de vista con el GW, no se puede recuperar, a pesar de que existan varios nodos vecinos que podrían retransmitir la información. De esta manera, la red disminuye su desempeño en entrega de paquetes.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Implementar una solución para mitigar la pérdida de paquetes por ausencia de línea de vista en redes LoRaWAN.

1.4.2 Objetivos específicos

- Seleccionar un protocolo para crear una red de malla.
- Implementar el protocolo en nodos LoRaWAN.
- Evaluar el desempeño del protocolo en una red con enlaces sin línea de vista.

1.5 Alcances

- El protocolo se probará en hardware con al menos 3 saltos.
- Se utilizarán al menos 6 nodos para el desarrollo de las pruebas.

1.6 Limitaciones

- Solamente se considerarán nodos estáticos.
- No se estudiará la potencia consumida de los nodos con los métodos planteados.
- Se trabajará con un solo protocolo de enrutamiento para la solución de red de malla.

2.Marco Teórico y Estado del Arte

2.1 Marco Teórico LoRaWAN

Para el desarrollo de este proyecto es necesario conocer las principales características de los equipos LoRa y las ventanas con las que trabaja LoRaWAN.

Existen tres clases de nodos LoRaWAN [15]:

Clase A: Dispositivos finales bidireccionales.

Este tipo de dispositivo está disponible en todos los nodos de transmisión. Los nodos dependen solo de ellos mismos para enviar un paquete. Después de enviar un paquete hacia el GW, el nodo abrirá una ventana de recepción donde esperará recibir un acuse. Si en esta ventana no recibe ningún paquete, se abrirá una segunda ventana para recibir el mismo mensaje. La Figura 2 muestra el comportamiento descrito: el cuadro negro representa la transmisión y su duración en el aire; por otra parte, los cuadros verdes representan las dos ventanas de recepción.

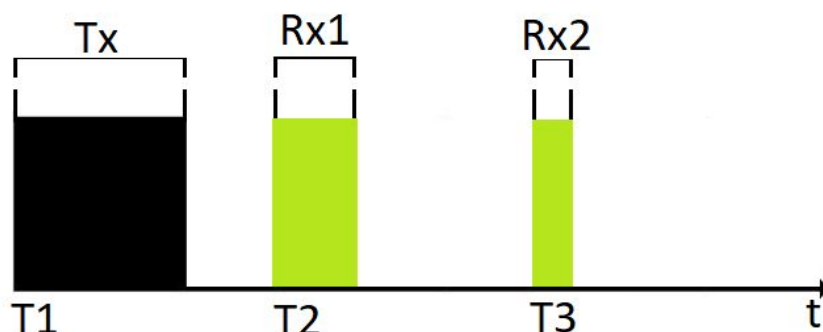


Figura 2. Funcionamiento de nodos clase A [15].

Clase B: Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción programadas.

En este modo, el GW envía señales beacon (guía) para poder coordinar la transmisión de los nodos. Es el nodo que puede contar con mayor número de ventanas de recepción. Sin embargo, depende de que el GW envíe las señales beacon. Los dispositivos de este tipo no pueden ser tipo C.

Clase C: Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción máxima.

En este modo, el Nodo se encuentra escuchando constantemente hasta que reciba un paquete o hasta que tenga que transmitir. Es la clase que consume más energía. Estos equipos no pueden ser tipo B. La Figura 3 representa el funcionamiento de esta clase, donde RX2 es la ventana constante de recepción que se mantiene activa hasta que transmita un mensaje o hasta que reciba uno por parte del GW. RX1 por su lado es la ventana de recepción que se abre en espera al acuse una vez se haya transmitido un mensaje.

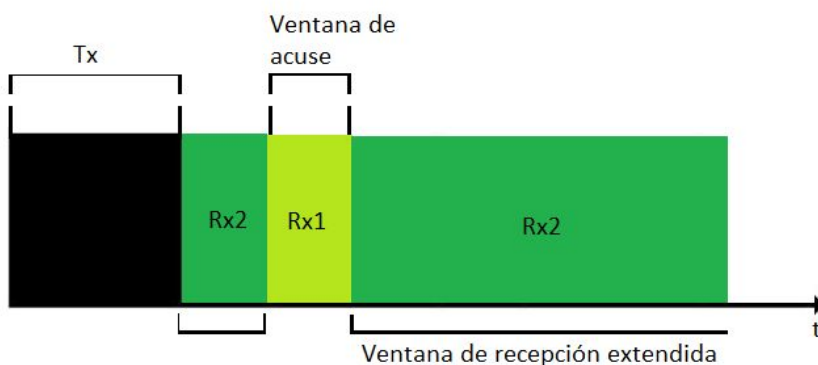


Figura 3. Funcionamiento de nodos clase C [15].

2.2 Trabajos Relacionados

El presente análisis se enfocará en estudios donde se encuentran aplicaciones de redes con múltiples saltos con equipos LPWAN, especialmente LoRaWAN.

En el estado del arte se encontraron las siguientes categorías: protocolos de enrutamiento entre GWs y enrutamiento entre nodos. Este último grupo es el de mayor interés para este trabajo y allí se encuentran propuestas para topologías tipo árbol y tipo malla.

Para el desarrollo de esta sección se tendrán en cuenta el tipo de protocolo utilizado (árbol, malla o inundación), dispositivos de enrutamiento (GWs o nodos LoRa), línea de vista entre los componentes de la red, el tipo de evaluación (pruebas en HW y/o simulaciones), métricas y resultados.

2.2.1 Enrutamiento entre GWs

Este tipo de protocolos mantiene la topología original de LoRaWAN y solamente el GW será el encargado de enviar el paquete a otro GW que contenga el destino final, el cual puede ser el servidor u otro nodo en la red.

Un ejemplo de estos estudios propone un protocolo creado con base en AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) y HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) [16]. El primero selecciona nuevas rutas y el segundo transmite los datos. Este artículo muestra pruebas para medir el retardo del envío de ida y vuelta de un paquete por medio de hasta máximo 3 saltos. Las pruebas fueron realizadas en HW con un máximo de 5 nodos Lopy, donde 3 fueron configurados como GW (para redirigir la información) y 2 como nodos (uno origen y otro destino). Los resultados muestran que con 4 saltos, el nodo inicial puede recibir el mensaje respuesta (acuse) en su segunda ventana de recepción. Las pruebas fueron realizadas en diferentes cuartos dentro de una bodega, no se especifican las condiciones de línea de vista. Se realizaron 200 pruebas pero su métrica era el tiempo de construcción de las rutas y no la cantidad de mensajes entregados [16].

Otro ejemplo propone la implementación de federaciones para mejorar el control de la red y la transferencia de paquetes entre GWs [17]. Cada federación planteada tiene su propia red LoRaWAN. Cada uno de los GWs está conectado a un solo GW maestro el cual es el encargado de todo el proceso de transmisión de paquetes de una federación a otra. Con el fin de evaluar el funcionamiento de esta topología se usó el simulador FLIPsim (Federation support for Long range low power Internet of things Protocols simulator). En el se configuraron 4 GWs y una cantidad de nodos desde 100 hasta 1000. Como conclusión del estudio se mostró que a medida que la cantidad de nodos en la red aumenta, disminuye la tasa de entrega de paquetes o PDR (Packet Delivery Ratio) [17].

2.2.2 Enrutamiento entre nodos

A diferencia de la sección anterior, esta se centra en estudiar aquellas propuestas que realizan el reenvío de paquetes entre nodos para llegar a un destino. Se estudiarán principalmente dos clases de redes: Tipo árbol y tipo malla.

2.2.2.1 Protocolos tipo árbol

Esta sección presenta varios algoritmos de enrutamiento basados en una red tipo árbol, donde la transmisión de los nodos finales se hace por medio de nodos padres que transmiten los mensajes hasta llegar a la raíz del árbol, la cual es el GW [18].

En [19] se plantea un protocolo basado en RPL (Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks) el cual fue nombrado RLMAC (RPL + LoRA MAC). Este consiste en realizar la transmisión de los nodos finales por medio de nodos enrutadores que utilizan diferentes valores de SF. Cada nodo enrutador tiene n slots de tiempo donde n es la cantidad de distintos SFs en uso. Cada SF tiene asignado su propio slot de tiempo donde se realiza la comunicación; entre más cerca del GW se encuentra el nodo, más pequeño es el SF usado. De esta forma, los nodos más alejados tendrán un SF mayor. Las pruebas se realizaron con cuatro nodos (tres enrutadores y uno GW) los cuales fueron ubicados en un edificio. El GW fue ubicado en el cuarto piso, el nodo transmisor en el primer piso y los nodos enrutadores en el segundo y tercer piso. No se especificó la altura de cada uno de los pisos, ni se especifican las condiciones de línea de vista. Se reportó un PDR (Packet Delivery Rate) de 86% para la única prueba realizada [19].

Otro trabajo presenta un protocolo basado en DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) [20]. Este tipo de protocolo tiene conocimiento de la red basado en una tabla de enrutamiento donde también se encuentra la cantidad de saltos al GW y la secuencia de los paquetes enviados y/o recibidos. La ruta seleccionada por el nodo más lejano será aquella con menor número de saltos. El GW envía constantemente señales beacon para mantener actualizada la tabla de enrutamiento. En el último salto se cambia de protocolo y el paquete es enviado como LoRaWAN, los paquetes intermedios son reenviados por medio de DSDV. Este protocolo es solo para mensajes que van dirigidos desde los nodos hacia el GW. Para corroborar el funcionamiento de la solución planteada, se realizaron pruebas en HW con 5 nodos LoRa (4 como nodos enrutadores y 1 como nodo final) y 1 GW. Para evaluar su rendimiento se midió el PRR (Packet Reception Rate) al final de la prueba, lo cual mostró valores por encima de 90% con 5 saltos. No se especifica la distancia entre los nodos, tampoco si tienen línea de vista. Los autores también informan en sus resultados que la tasa de recepción de paquetes va disminuyendo en promedio 2.2% a medida que aumenta el número de saltos [20].

Huang-Chen Lee y Kai-Hsiang Ke proponen en [9] una solución de enrutamiento aplicando el principio de una topología tipo árbol, donde los nodos más lejanos y con peor nivel de RSS (Received Signal Strength), se unen a la red por medio de nodos intermedios mejorando notablemente los resultados de PDR. Para llegar a estos resultados se hicieron pruebas con 19 nodos Semtech, todos ubicados en puntos fijos sin línea de vista al GW. Primero hicieron pruebas con el protocolo LoRaWAN original (topología estrella de estrellas) donde cinco nodos presentaron 0% de PDR. En este protocolo, cada uno de los nodos padres (incluido el GW) almacena una lista de hijos; dicha lista es enviada hasta el GW para tener conocimiento total de la red. Al finalizar la prueba, dos de los cinco nodos obtuvieron PDR por encima del 90%, otros dos alrededor de 70% y un nodo con 8% [9].

El siguiente estudio relacionado es un diseño por M. Usmonov y F Gregoretti de un protocolo que busca eliminar el uso de GWs y servidores LoRa [21]. Este protocolo contaría con un conocimiento parcial de la red ya que la transmisión es coordinada por un nodo central, el cual hace las funciones de GW, y selecciona la ruta y el tiempo de envío de paquetes. Esta solución está pensada para un máximo de 1000 nodos. Los equipos propuestos para esta implementación son Semtech SX1278 (para los nodos remotos) y la misma referencia, pero con módulo WiFi para el nodo central. No se realizan pruebas en hardware, solamente se calcula el consumo de energía estimado. [21].

En otro artículo se plantea un protocolo tipo árbol donde la información es segmentada por distintas subredes [22]. Cada una de las subredes utiliza un valor de SF. El protocolo, denominado TSCA (Tree-based SF Clustering Algorithm), tiene como objetivo que el nodo se incorpore a la red con el menor número de saltos y tiempo en el aire para que pueda tener una comunicación exitosa con el GW. En las pruebas realizadas se usaron 36 nodos Semtech SX1276 y microprocesadores STM32L0, los cuales fueron distribuidos en dos edificios. En la red formada no todos los nodos tienen línea de vista con el gateway. Los resultados mostraron que el algoritmo propuesto alcanzaba valores de tasa de recepción de paquetes, en promedio, de encima de 90% para cada SF. La cantidad máxima de saltos alcanzada fue de 8 [22].

C. Ebi et al proponen un protocolo tipo malla para comunicar nodos sensores (SN) con un nodo repetidor (RN) el cual almacenará todos los datos recogidos en un ciclo de recolección y procederá a enviarlos al GW usando un paquete LoRaWAN [23]. Este protocolo se basa en TDMA (Time Division Multiple Access). Se realizaron pruebas en hardware con hasta 16 nodos. Las pruebas consistían en comparar el rendimiento del protocolo LoRaWAN y el desarrollado por los autores, denominado "Malla sincronizada LoRa". Para la realización de las pruebas, se ubicaron 11 en un acueducto y los cinco restantes en postes de luz en las calles, . Estos últimos nodos tienen la función de reenviar los mensajes recibidos de otros nodos y reenviarlos hasta el GW. Como resultado final se obtuvo que el protocolo propuesto tiene una tasa de error de paquete inferior al 2%, mientras que LoRaWAN tiene un 15% aproximadamente. No especifican las condiciones de línea de vista de cada uno de los nodos. La cantidad máxima de saltos fue de dos [23].

2.2.2.2 Protocolos tipo Malla

Este tipo de protocolos a diferencia del tipo árbol, no guarda una jerarquización en la red y puede llegar a tener más de una ruta para transmitir un mensaje hasta su destino.

El primer ejemplo plantea un protocolo de enrutamiento lineal que consta de tres etapas: Sincronización, transferencia de datos, y descanso. El protocolo está pensado para ser implementado en sistemas de alcantarillado existentes donde se requiere una medición constante de niveles de agua y otras variables de interés en la ciudad de Siena, Italia. Las pruebas fueron realizadas en simulaciones para calcular un estimado del consumo de energía por paquete entregado dependiendo del número de nodos retransmisores. Para ello

implementaron una red formada por un nodo final, uno retransmisor y un GW. La cantidad máxima de nodos simulados fue de 20. Con las simulaciones se mostró el consumo esperado de energía de cada uno de los nodos. Como resultado final, se muestra que el promedio de la corriente utilizada por el protocolo propuesto es inferior a 1.2 mAh. Se estima que la pérdida de paquetes es inferior a 0,05. El artículo no especifica si los enlaces tienen línea de vista [24].

A. Bhardwaj y A. Raj Singh Tomar presentan un protocolo tipo inundación con el nombre de LPLoRaWAN. Al momento de inicializar los nodos envían mensajes broadcast para descubrir sus nodos vecinos y agregarlos a su tabla de enrutamiento. Este proceso es nombrado por los autores como Cluster, donde los nodos pueden ser descubiertos de forma directa (siendo el nodo un vecino inmediato) o indirecta (por medio de un mensaje reenviado por un vecino). De manera aleatoria, los nodos entrarán en estados de sueño o recepción para ahorrar energía y recibir los mensajes a reenviar. Estos estados son calculados en ranuras temporales definidas en el protocolo. Se realizan pruebas tanto en hardware como en simulaciones; para las primeras, los nodos se ubicaron en un edificio sin línea de vista entre ellos, pero no se indica la cantidad o características de los nodos usados. En las pruebas por simulación se utilizó MATLAB y se configuraron 64 nodos. Según los resultados, se recibieron 100% de los paquetes [25].

Otro sistema tipo malla es propuesto como solución para mejorar la seguridad y monitoreo de los niños, principalmente cerca a paraderos de autobuses. No se especifica el tipo de nodos ni pruebas realizadas para verificar la viabilidad del presente diseño; solo se presenta el algoritmo para selección de rutas. El artículo menciona que es posible desarrollarlo para que envíe mensajes broadcast hasta un máximo de 35 nodos. Básicamente el nodo a transmitir se asociará con la estación de bus que tenga menos saltos hasta el GW [26].

Otro protocolo usado para poder implementar una posible solución a la transferencia de paquetes es AODV, implementado sobre la capa física de LoRa. Para el desarrollo de estas pruebas se usaron 4 nodos Semtech SX1278. Se concluyó que, debido a la latencia generada por esta solución, no se recomienda su uso para aplicaciones que requieran altas tasas en la creación de rutas. No se especifica si las pruebas tenían condiciones de línea de vista. Tampoco se presentan resultados cuantitativos de PDR [27].

Otros autores proponen un protocolo de transmisión concurrente (CT) [28]. El protocolo utiliza nodos repetidores los cuales estarán transmitiendo de forma simultánea hasta llegar al nodo principal. El protocolo fue comprobado por

simulaciones y pruebas en hardware, en las cuales se usaron varios escenarios: uno con baja densidad de nodos cercanos, otro con alta densidad y uno que se define como crítico, donde se agrupan hasta cuatro nodos por punto. Los nodos fueron ubicados en una zona de 195x290m². No se especifican condiciones de línea de vista, sin embargo se menciona que están distribuidos en 14 edificios. Se usaron 18 nodos los cuales transmitieron un total de 100 paquetes. La cantidad de saltos promedio lograda fue de dos. Los resultados obtenidos para las redes con baja y alta densidad de nodos, muestran que el valor promedio de PDR fue mayor a 98% con un número máximo de 3.71 saltos. Por otra parte para el escenario crítico, el PDR promedio fue de 77%, con cinco saltos [28].

El último ejemplo es el protocolo LoRaBlink [29], el cual es bastante citado para el enrutamiento de paquetes entre dispositivos LoRa. Este consiste en la coordinación de las ventanas de recepción y transmisión de los nodos por medio de señales beacon enviadas desde el GW hasta los nodos que generan el mensaje original. Una vez que un nodo recibe la orden de transmitir, envía su mensaje por medio de mensajes broadcast hasta llegar al destino. Para las pruebas se usaron 6 nodos Semtech SX1272, distribuidos en un campus universitario, todos sin línea de vista entre sí y hacia el GW. Como resultado se obtuvo PDR por encima de 80%, lo cual fue catalogado como satisfactorio por parte de los desarrolladores [29].

2.2.3 MACGSP6 (Medium Access Control for Gossip-based Sleep Protocol Version 6) [30].

MACGSP6 está diseñado para redes de sensores con poca energía disponible. Consiste en una transmisión por medio de gossip (chisme) para retransmitir los paquetes hasta un nodo final. Cada uno de los nodos pertenecientes a la red cambia de estado entre recepción y dormido (radio apagado) de acuerdo con la probabilidad de chisme. Con este protocolo, el nodo solo retransmitirá en el caso de que escuche un mensaje mientras se encuentre activo. El protocolo se ha probado en simulaciones de hasta 1000 nodos [30] y en hardware con 8 nodos, en una red con enlaces sin línea de vista [31]. En este artículo no se trabajó con equipos LPWAN y los resultados muestran que las pérdidas de paquetes están entre 8% y 12%, con enlaces degradados, por lo cual se puede considerar como un protocolo para nodos en las condiciones requeridas para este proyecto. A continuación se describe el funcionamiento detallado del protocolo [30].

MACGSP6 divide el tiempo en períodos de chisme. En los criterios de diseño, se define la probabilidad p_{gsp} (llamada probabilidad de chisme), la cual servirá para

indicar si el nodo se mantiene dormido o abre sus ventanas de recepción. Con p_{gsp} , los nodos mantienen su radio apagado. Con $1-p_{gsp}$, el nodo abre su la ventana de recepción y escucha si algún nodo transmite un paquete. Al inicio de cada período de chisme, los nodos calculan p_{gsp} para definir su estado en ese periodo. La Figura 4 muestra estas ventanas. Cuando el nodo receptor escucha algún mensaje, lo re-envía en el siguiente periodo de chisme.

En la Figura 4, el tiempo entre T1 y T2 se denomina período de chisme (GP). El espacio temporal donde se abren las ventanas de recepción o transmisión se denomina sección activa y el tiempo entre dos secciones activas se denomina espacio de descanso, en la cual el nodo se encuentra durmiendo. De esta forma, se crea un ciclo de trabajo en cada período de chisme.

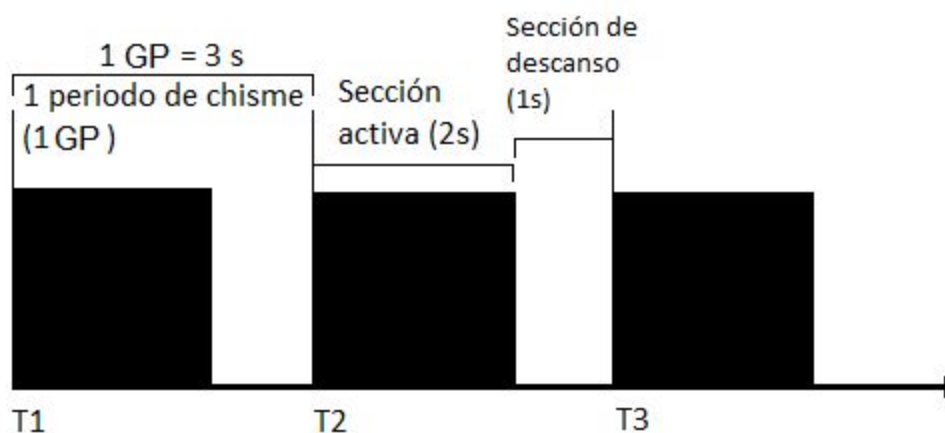


Figura 4. Ciclo de trabajo de MACGSP6.

Para confirmar que el mensaje transmitido fue recibido correctamente, una vez que el nodo transmite un mensaje, abre sus ventanas de recepción en el siguiente GP. Si en ese instante recibe un mensaje (no necesariamente el mismo mensaje que envió previamente), lo tomará como confirmación del que había enviado (acuse implícito) y procederá a dormir durante un tiempo de quietud (Quiescent Period, QP), que tiene una duración de varios GP. De lo contrario, reenviará el mensaje nuevamente en el siguiente GP y después de eso procederá a un QP (Figura 5). Los QP se usan para evitar la inundación de la red con mensajes repetidos y para evitar posibles colisiones.



Figura 5. Representación gráfica cuando el nodo pasa al tiempo de quietud. En este ejemplo 1 QP = 10 GP.

MACGSP6 no calcula rutas de manera explícita. El mensaje se retransmite por todos los nodos que tengan su radio encendido en ese momento. Todos los nodos utilizan la misma probabilidad de chisme, que se define antes de implementar la red.

A continuación se presenta una tabla con el resumen de los protocolos revisados y sus características principales:

Paper/protocolo	Enrutamiento	Implementation	Nodos	Salto (max)	Línea de Vista
Lundell et al [16]	Entre GWs	HW	5	3	--
FLIP [17]	Entre GWs	SW	4	--	NA
RLMAC [19]	Árbol	HW	4	2	--
DSDV [20]	Árbol	HW	5	5	--
LoRa Mesh [9]	Árbol	HW	19	3	No
Usmonov y Gregoretti [21]	Árbol	HW	--	--	--
TSCA [22]	Árbol	HW	36	8	No
Synchronous LoRa mesh [23]	Árbol	HW	16	2	No
Abrardo y Pozzebon [24]	Malla	SW	20	19	NA
LPLoRaWAN [25]	Malla	HW	--	--	No
Tanaka et al. [26]	Malla	--	35	--	--
AODV [27]	Malla	HW	4	3	--
CT-LoRa [28]	Malla	HW	18	2	--
LoRaBlink [29]	Malla	HW	6	2	No
MACGSP6 [31]	Gossip	HW	8	--	No

Tabla 1. Resumen de los protocolos y artículos revisados en esta sección. La columna de Línea de vista hace referencia a la condición de la mayoría de los nodos del paper citado. (*): Protocolos no implementados en LoRa. HW: Hardware; SW: Simulación.

3. Descripción de la solución

3.1 Algoritmo

Teniendo en cuenta el protocolo seleccionado, se desarrolló el algoritmo que se puede observar en el diagrama de flujos de la Figura 6. Este comienza con las configuraciones iniciales, como seleccionar el DR (data rate o tasa de transmisión de datos), SF (spreading factor), frecuencia, potencia de transmisión, etc. Dado que MACGSP6 es un protocolo de gossip, se implementó un contador de saltos (similar al TTL del protocolo IP) como en [31], con un máximo valor de 20, el cual se reduce al recibir un paquete. Si el contador llega a cero, el mensaje será descartado y no se reenviará. De esta manera, se ayuda a disminuir la cantidad de mensajes que viajan durante mucho tiempo por la red.

Luego, el nodo revisa si tiene algún mensaje por enviar. Si no tiene pasará a generar una probabilidad p (donde $0 < p < 1$); si el valor p calculado es menor o igual a la probabilidad de chisme (p_{gsp}) estipulada, el nodo pasará a dormir 1 GP, de lo contrario abrirá una ventana de recepción. Para este estudio se seleccionó $p_{gsp} = 0.3$, porque en [30] se encontró que este valor representa una buena relación costo-beneficio entre consumo de energía y entrega de paquetes. La implementación realizada en este estudio con LoRa utilizó 1 GP = tres segundos, la sección inactiva es de 1 segundo y el QP=10 GP.

Si el nodo recibe un mensaje, revisará si en el periodo anterior había enviado uno o no. En el caso de no haber enviado, pasará a disminuir el contador de saltos del mensaje; si este llega a 0, el algoritmo descartará el mensaje, no lo enviará y pasará a dormir durante el QP. Posteriormente abrirá nuevamente la ventana de recepción. Si al haber recibido un mensaje y decrementar el contador de saltos este no llega a 0, el nodo procederá a reenviarlo y abrirá una ventana de recepción esperando que el mensaje sea retransmitido y él lo escuche nuevamente, para confirmar que haya sido reenviado. Si esto sucede, pasará a

dormir un QP; de lo contrario, en el siguiente periodo, reenviará nuevamente el mensaje y pasará a dormir un QP.

En el caso de que la ventana de recepción no reciba ningún mensaje, el siguiente paso es revisar si en el periodo inmediatamente anterior había enviado un mensaje o no. Si no había enviado mensaje, el nodo pasará a dormir hasta el siguiente periodo de chisme. En caso contrario, reenviará el mensaje en el siguiente periodo y posteriormente dormirá durante 1 QP.

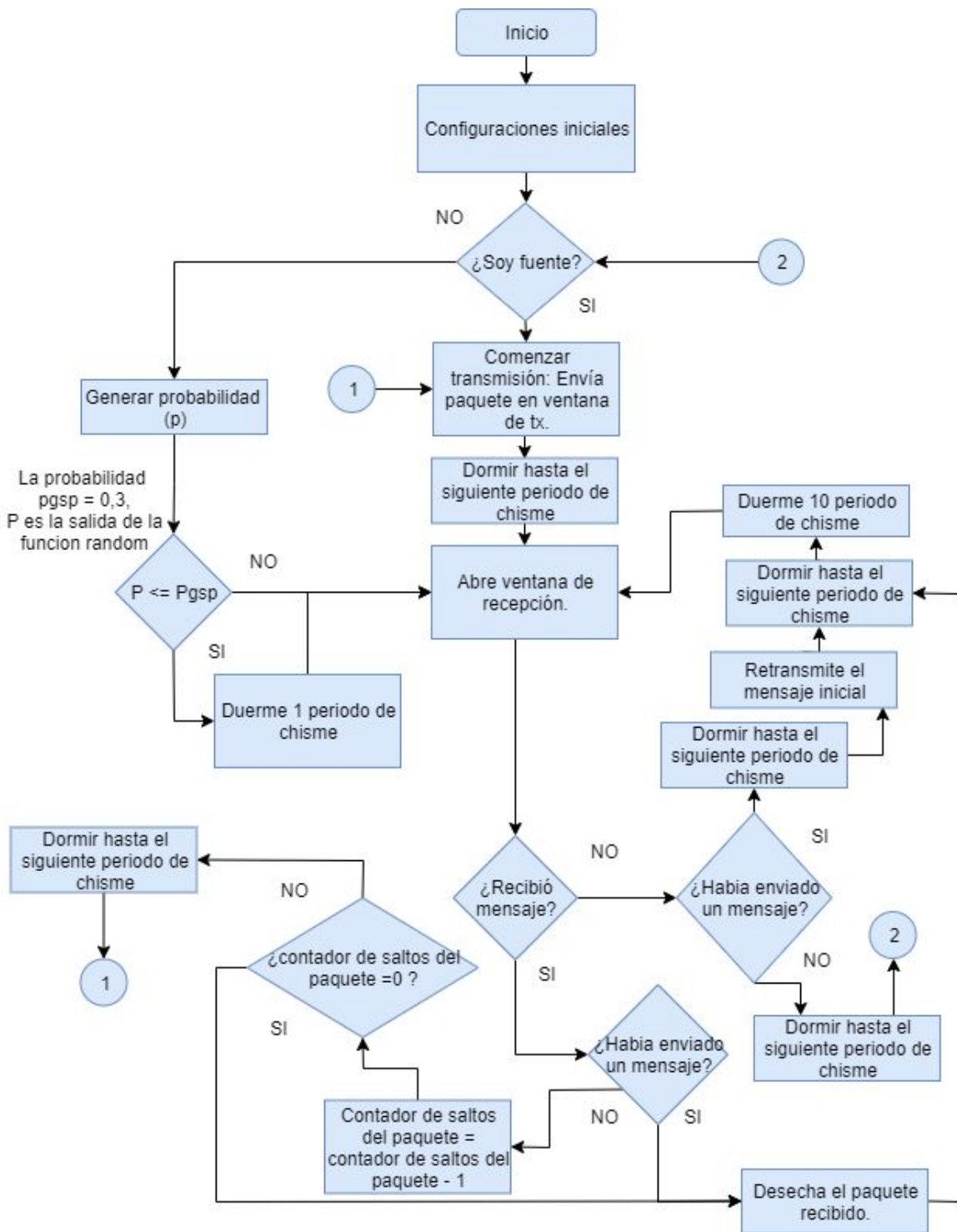


Figura 6. Diagrama de flujo del protocolo MACGSP6 implementado en este proyecto.

3.2 Implementación

La implementación del algoritmo se realizará en dos tipos de dispositivos: Nodos y GW Seeduoino LoRawan. Los nodos son tarjetas de desarrollo con el protocolo LoRaWAN embebido. Cada una de estas tarjetas cuenta con un módulo de transmisión RHF76-052AM (Figura 7), el cual es compatible con los modos de operación A y C de LoRaWAN [32].

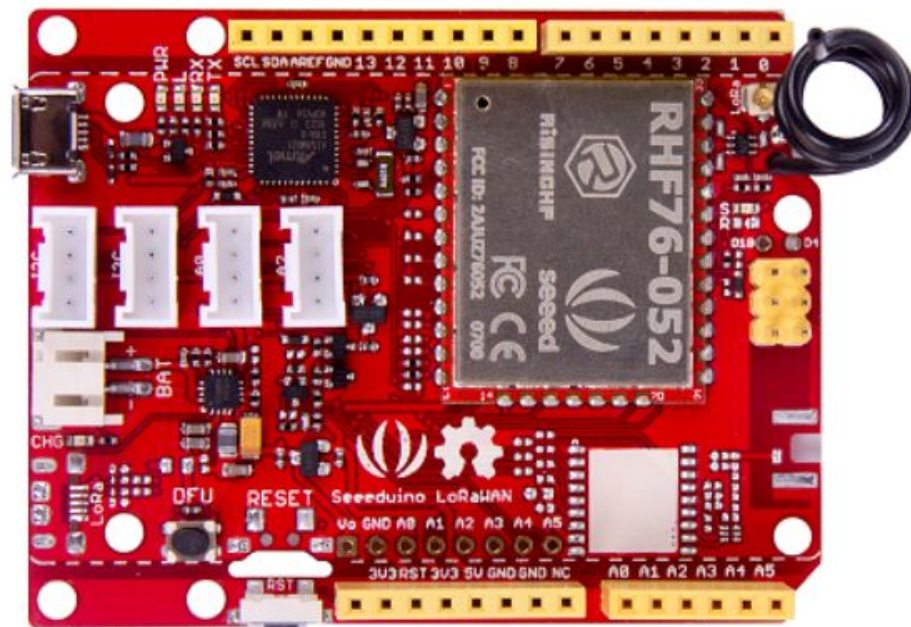


Figura 7. Tarjeta de desarrollo Seeduoino LoRaWAN [32].

Estos equipos cuentan con dos modos principales: Punto a punto (P2P) y Activación por personalización (ABP). El primero de ellos se usa para la comunicación punto a punto entre dos o más nodos LoRa y el segundo para la comunicación directa entre el GW y los nodos. MACGSP6 se implementó en el modo P2P, utilizando la mínima potencia de transmisión disponible, 10 dBm. Cada nodo se alimenta a través del puerto USB de un computador portátil y también utiliza un powerbank como fuente alternativa de energía. Todos los nodos LoRa de la red se configuraron para ejecutar MACGSP6 en modo P2P. Aparte de esto, solo uno de ellos será el encargado de retransmitir los paquetes recibidos de los otros nodos hacia el GW en modo ABP, con operación clase A y

con potencia de 10 dBm. Dicho nodo es el único que tiene línea de vista con el GW. Los demás no pueden comunicarse directamente.

Por su parte el GW está formado por una tarjeta Raspberry Pi 3 y el módulo LoRa RHF0M301-915 (Figura 8). Así mismo, cuenta con un servidor local, el cual almacena toda la información recibida por el dispositivo a través de sus enlaces LoRaWAN. Adicionalmente, el GW utilizado funciona en la banda de frecuencias libre para América (US915), la cual está libre para Colombia [33] [34].



Figura 8. GW Seeduo LoRaWAN [33].

4. Pruebas y resultados

Como lugar de las pruebas se determinó el campus de la Universidad del Norte, el cual cuenta con las características necesarias para crear una situación problema donde los nodos no tengan línea de vista con el GW y el enlace LoRaWAN sea débil o simplemente no exista. Para determinar la ubicación de estos nodos, el estado de los enlaces que entre ellos puedan existir y el consumo de energía, se determinaron tres pruebas preliminares. Con ellas se obtuvo la información necesaria para implementar la red en la que posteriormente se ejecutó MACGSP6 con los nodos LoRa.

4.1 Pruebas preliminares

Se hicieron tres tipos de pruebas: pruebas de enlace LoRaWAN entre el GW y cada uno de los nodos en su respectiva localización, pruebas de enlace entre cada uno de los nodos y prueba de consumo de energía durante las ventanas de transmisión y recepción.

4.1.1 Prueba de enlace LoRaWAN

El fin de esta prueba es seleccionar puntos donde los nodos no tengan línea de vista entre sí ni exista un enlace directo entre cada uno de los nodos y el GW. Esto con el fin de formar una red con nodos LoRa que, por medio de un protocolo diferente al de LoRaWAN, pueda redirigir los mensajes entre ellos hasta llegar al GW. En total se usaron seis nodos LoRa.

La prueba inicial consiste en verificar que el único método de comunicación entre el GW y los nodos LoRa es por medio del modo APB utilizando LoRaWAN. Las pruebas se realizaron en un ambiente de laboratorio donde se transmitieron 100 mensajes en modo P2P, donde el GW no recibió ninguno. Posteriormente se repitió la prueba pero en modo ABP (LoRaWAN) y todos los mensajes fueron entregados de manera exitosa.

Durante estas pruebas también se evidenció un comportamiento no esperado en el enlace LoRaWAN (ABP) configurado en el modo US915HYB, que corresponde a la banda US915. En este caso, el GW recibía el mensaje enviado por el nodo pero no enviaba la confirmación. De los 100 mensajes recibidos por el GW, ni uno solo fue confirmado. Para poder aislar el problema, se reconfiguró el nodo y el GW a la banda europea (EU868); en ella se enviaron 100 mensajes del nodo al GW, todos fueron recibidos y el GW envió la respectiva confirmación de cada uno. Sin embargo como esta banda no es libre en Colombia, se procedió a regresar a la versión de software (SW) original (US915HYB).

Con esta información, se determinaron tres tipos de nodos para la realización de las pruebas: nodo origen de transmisión, nodos enrutadores y nodo de relevo (relay). El primero es el encargado de generar los mensajes utilizando MACGSP6. Los segundos retransmiten los mensajes del transmisor usando el mismo protocolo. El último nodo recibe los mensajes con MACGSP6 (en modo P2P) y los redirige hacia el GW en modo ABP.

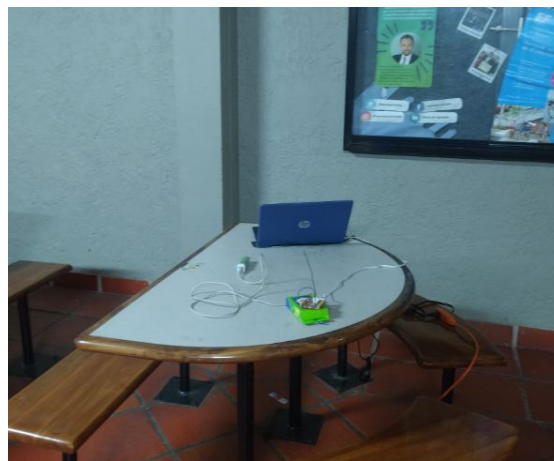
Para la realización de las pruebas se requería utilizar computadores portátiles y tener tomacorrientes cercanos. Por esto, siguiendo un esquema parecido a [35], los puntos fueron ubicados y numerados como se ve en las Figuras 8 y 9.



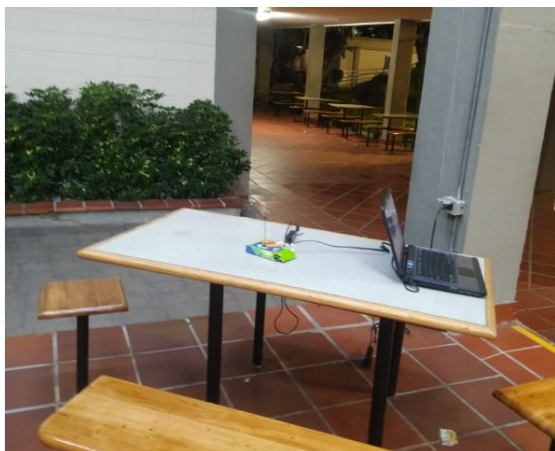
Figura 8. Posición final de los nodos.



(a) Nodo 1: Al lado de Kilómetro 5



(b) Nodo 2: Mesas del bloque B



(c) Nodo 3: Mesas del bloque A



(d) Nodo 4: enfrente de la oficina de Viajes Corporativos



(e) Nodo 5: Mesas del bloque D



(f) Nodo 6: Auditorio Marvel Moreno



(g) GW: Laboratorio de Ingenierías Eléctrica y Electrónica

Figura 9. Ubicación de los nodos.

Para la ejecución de estas pruebas se enviaron 100 mensajes en modo ABP y con la tasa de transmisión más alta (DR3, 5470 bps), para poder garantizar que no existieran enlaces LoRaWAN con cada uno de los puntos y el GW. Después de 3 repeticiones, los puntos 2, 3, 4, 5 y 6 no presentaron enlace LoRaWAN con el GW. Por otra parte, el nodo ubicado en el punto 1, transmitió el 100% de manera exitosa hasta el GW, mostrando un enlace LoRaWAN fuerte. Cuando el nodo 1 transmite al gateway, utiliza la Clase A de LoRaWAN. Dado que la red utiliza seis nodos y un GW, se da cumplimiento al segundo alcance de esta tesis.

De acuerdo con estos resultados, se estableció que durante las pruebas de MACGSP6, los nodos del 2 al 6 son los nodos transmisores y/o enrutadores, mientras que el nodo 1 siempre debe realizar las funciones de relevo.

4.1.2 Pruebas de enlace punto a punto

Es importante caracterizar el enlace existente entre cada uno de los nodos. Por esto, en esta prueba se configuró un nodo como transmisor, enviando 100 paquetes y otro nodo como receptor, cada 1.5 segundos. Una vez terminada la prueba, se invierten los roles y se evalúa el estado del enlace con la cantidad de mensajes recibidos y su respectivo valor de RSS (Received Signal Strength). Los

paquetes se envían con DR3, correspondiente a la tasa implementada en MACGSP6.

En la Tabla 2 se puede ver el porcentaje de mensajes recibidos en cada una de las pruebas.

	Nodo Rx					
Nodo Tx	1	2	3	4	5	6
1	--	0.98	0.91	--	--	0.9
2	0.9	--	0.91	0.85	0.9	0.85
3	0.93	0.91	--	0.93	0.94	0.9
4	--	0.91	0.91	--	--	--
5	--	0.93	0.91	--	--	0.85
6	0.81	0.92	0.91	--	0.91	--

Tabla 2. Porcentaje de mensajes recibidos por enlace.

Por otra parte, teniendo en cuenta los criterios de categorización utilizados en [35], los enlaces se definieron como bueno, normal y malo dependiendo de los valores en la Tabla 2, así.

Enlace Bueno: mayor o igual a 90%

Enlace Normal: Entre 75 y 90%

Enlace Malo: menor a 75%

Usando esta misma categorización, los enlaces resultantes se pueden ver en la Figura 11. Las líneas negras representan enlaces buenos, las azules enlaces normales. Por otra parte si la línea presenta alguna flecha, esta señala el nodo receptor al que corresponde el tipo de enlace. Las líneas sin flecha indican que el tipo de enlace es el mismo para ambas direcciones.

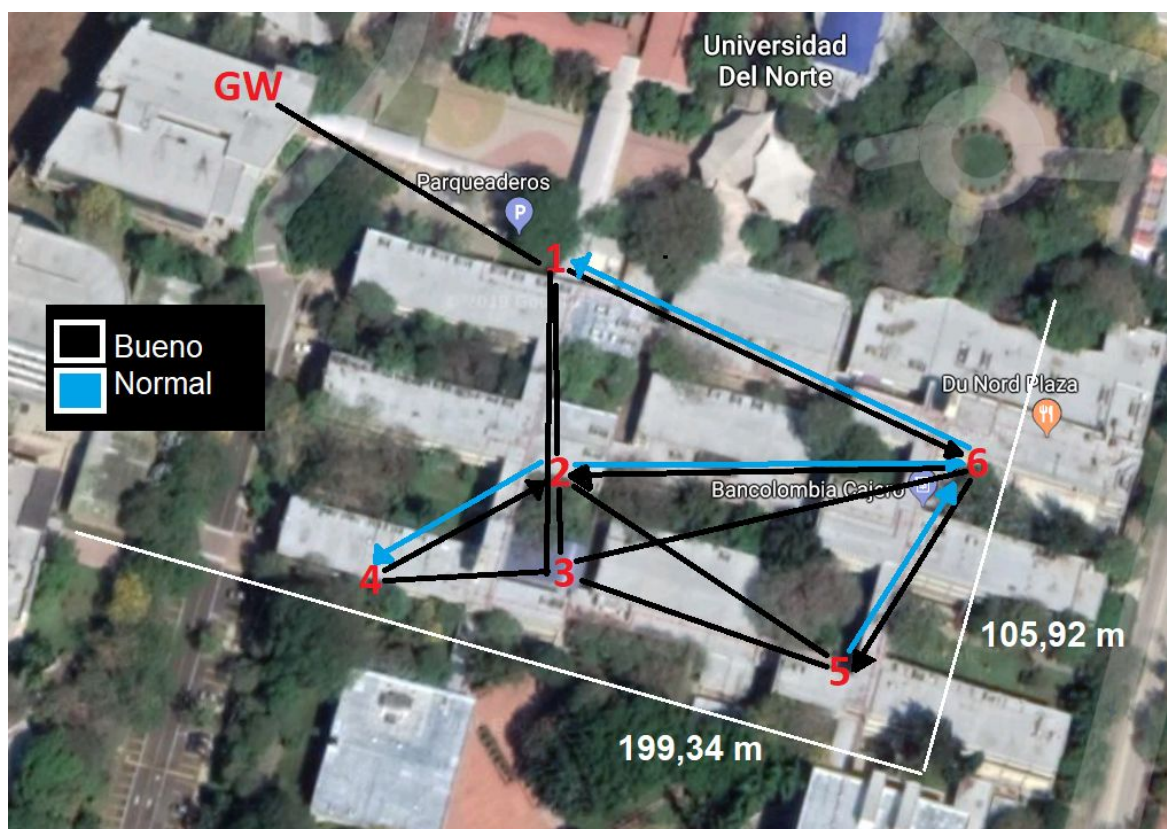


Figura 10. Enlaces resultantes entre los nodos 1-6. Las líneas azules entre los nodos representan los enlaces normales. Las líneas negras representan enlaces buenos. La dirección de los enlaces se representa con una flecha que apunta al nodo destino. Los enlaces donde el PRR es igual a 0 (cero) no fueron tenidos en cuenta.

Como se puede observar en la Figura 10, todos los enlaces resultantes resultaron buenos o normales. Sin embargo, se presentaron casos en que el enlace entre dos nodos no era estrictamente simétrico en ambas direcciones. Un ejemplo de esto son los enlaces presentes entre el nodo 6 y 5 donde dependiendo del nodo transmisor el enlace puede ser bueno o normal. Una posible razón de esto puede ser el funcionamiento en la zona gris de las comunicaciones inalámbricas, la cual se puede definir como enlaces donde el porcentaje de paquetes recibidos varía entre 0 y 90% [36].

En la Tabla 3 se puede ver el RSS promedio de estos mismos enlaces, en dBm, obtenidos a partir de los paquetes recibidos.

Nodo Tx	Nodo Rx					
	1	2	3	4	5	6
1	--	-99.56 ± 1.13	-102.09 ± 0.56	--	--	-118.97 ± 0.56
2	-101.42 ± 1.08	--	-83.35 ± 0.15	-114.99 ± 0.44	-102.6 ± 0.15	-106.96 ± 0.31
3	-99.53 ± 0.28	-81.37 ± 0.14	--	-101.04 ± 0.31	-93.82 ± 0.76	-123.03 ± 0.39
4	--	-114.44 ± 0.3	-102.95 ± 0.31	--	--	--
5	--	-102.49 ± 0.15	-96.03 ± 0.65	--	--	-106.76 ± 0.81
6	-117.86 ± 0.46	-107.47 ± 0.22	-119.21 ± 0.26	--	-103.03 ± 0.3	--

Tabla 3. RSS promedio por enlace en dBm con intervalos de confianza de 95%.

Todos los enlaces en la Tabla 3 presentan niveles de señal recibida muy superiores a la sensibilidad de los módulos Seeeduino (-140 dBm) [32]. Algunos enlaces pueden no ser simétricos. Por esto, la tabla 3 muestra los valores promedio del valor de RSS de los enlaces con intervalos de confianza del 95%.

La Tabla 3 permite visualizar claramente cuáles enlaces son mejores en cada nodo. Por ejemplo, el nodo 1 tiene sus mejores enlaces con los nodos 2 y 3. Con el nodo 6, el nivel de señal recibida es menor. También puede verse que los enlaces entre diferentes nodos muestran características de asimetría, ya que, con el 95% de confianza, el promedio de RSS y PRR son inferiores en una dirección comparada con la otra. Este caso se observa claramente en los enlaces 3-4, 3-6, 3-5 y 5-6.

Tanto la Tabla 2 como la Tabla 3 confirman que la red está funcionando bajo condiciones no ideales, lo cual permite verificar el desempeño del protocolo en un ambiente cercano a aplicaciones de IoT.

4.1.3 Prueba de consumo de corriente

Cabe aclarar que esta prueba no estaba dentro de los alcances de esta tesis. Sin embargo, es importante para futuras implementaciones con la misma plataforma, debido a que el bajo consumo de la corriente es una de las características principales tanto de LoRa como MACGSP6, por lo cual se documentan los resultados en esta sección.

Para la ejecución de esta prueba se siguió el método planteado en [37]. Así, se realizó el montaje de la Figura 11, el cual está formado por un Osciloscopio digital

Tektronix TBS 1072B-EDU, un Seeeduino LoRaWAN programado como transmisor con MACGSP6, una fuente de 4.83 voltios y una resistencia de 10 Ohm. En esta prueba no se utilizó ningún nodo enrutador ni relevo, por tanto, el nodo transmisor no recibe ningún acuse implícito.

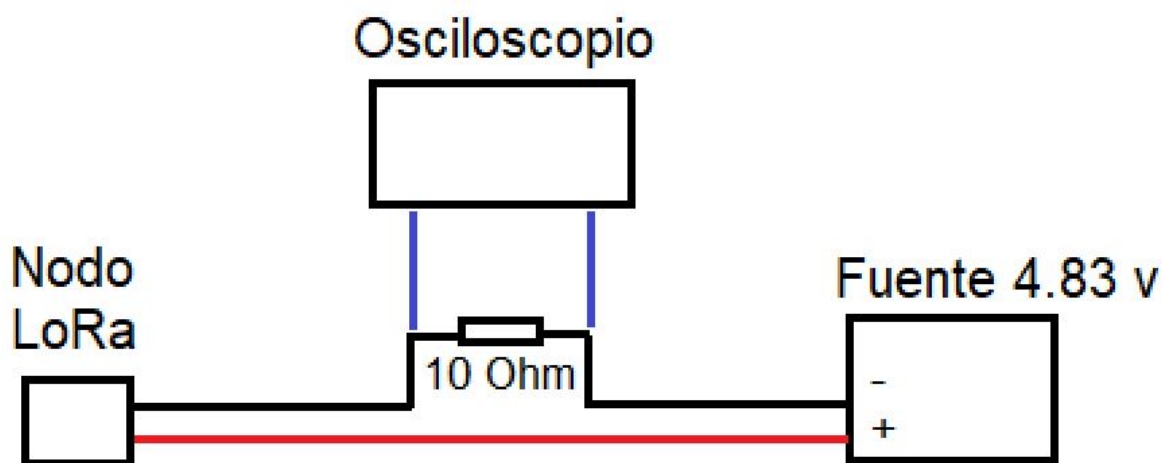


Figura 11. Prueba de consumo de corriente. Elementos utilizados: Fuente 4.83v, Osciloscopio, resistencia de 10 Ohm, nodo LoRa.

Con el montaje de la Figura 11, se puede calcular la corriente instantánea por el circuito con la siguiente ecuación [37]:

$$I = V \div R \quad (1)$$

I: Corriente en Amperios

V: Tensión en voltios

R: Resistencia en Ohm

En la Figura 12 se puede ver la tensión del nodo durante cuatro períodos de chisme, marcados con rojo como I, II, III y IV. Como se puede ver con los cursores, cada periodo tiene una duración de tres segundos. En la sección I el nodo abre la ventana de recepción para revisar si recibe algún mensaje en el círculo 1 (Figura 12). Al no recibir nada, pasa al espacio de descanso (círculo 1, Figura 13) y revisa si tiene algún mensaje por enviar. Como en esta prueba el nodo es la fuente de información, envía al inicio del siguiente GP (sección II, Figura 12). Luego vuelve al espacio de descanso (círculo 2, Figura 13) y vuelve a abrir ventana de recepción en el siguiente GP (sección III, Figura 12). Como no

recibe nada pasa a reenviar en IV (Figura 12). El resumen el comportamiento de la Figura 12 es igual al mostrado en la Figura 4.

Como se puede ver en la Figura 12, la tensión en la resistencia cuando el nodo abre sus ventana de recepción se encuentra entre 410 mV y 520 mV aproximadamente. Usando la ecuación 1 se tiene que la corriente tiene dos niveles: 42 mA y 52 mA. Este incremento del consumo se debe a los procesamientos internos que realiza el código para determinar si un mensaje fue recibido o no. Sin embargo esto no afecta funcionamiento a la hora de recibir un mensaje.

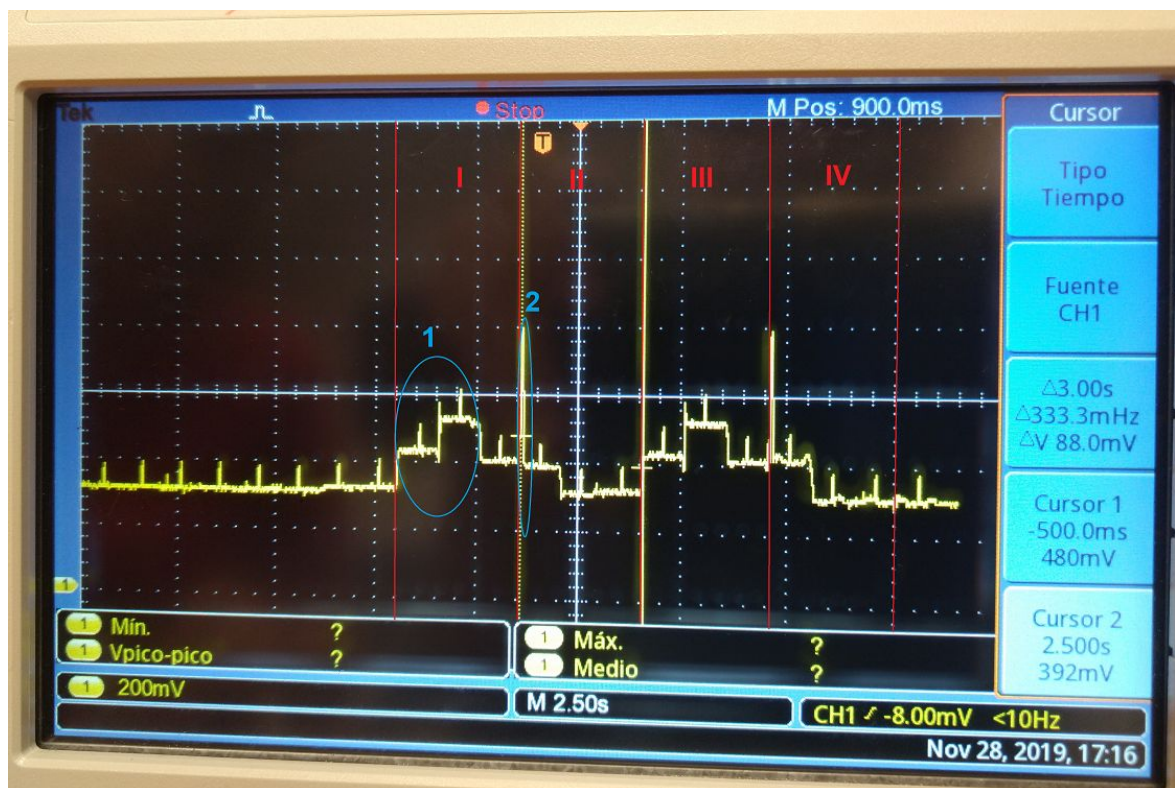


Figura 12. Ventanas de recepción y transmisión de MACGSP6 en LoRa. El círculo 1 representa a la recepción y el 2 a la transmisión. Las secciones I, II, III y IV representan 4 GPs diferentes. Donde se pueden ver dos ventanas recepción (secciones I y III) y dos de transmisión (secciones II y IV), una para transmitir el mensaje original, y la segunda para reenviarlo debido a que no se recibió el debido acuse en la sección III.

En la Figura 12 se puede ver que la tensión en la resistencia al enviar es de 792 mV. Por medio de la ecuación 1 se calcula que la corriente utilizada es de 79.2 mA.

La Figura 13 enfatiza los valores de tensión en los diferentes instantes de sueño que tiene el nodo mientras ejecuta MACGSP6. Para diferenciarlos, se encerraron en cuatro diferentes círculos. El círculo 1 muestra cuando el nodo viene de abrir su ventana de recepción y pasa al espacio de descanso durante 1 s hasta el siguiente GP. Por otra parte, el círculo 2 muestra cuando el nodo termina de enviar su mensaje y pasa a dormir; allí la corriente es menor y coincide con los círculos 3 y 4, donde el nodo está durmiendo durante un QP. Los círculos 1 y 2 corresponden al periodo de descanso mencionado en la Figura 4, el cual ocurre inmediatamente después de una sección activa (ventana de transmisión o recepción).

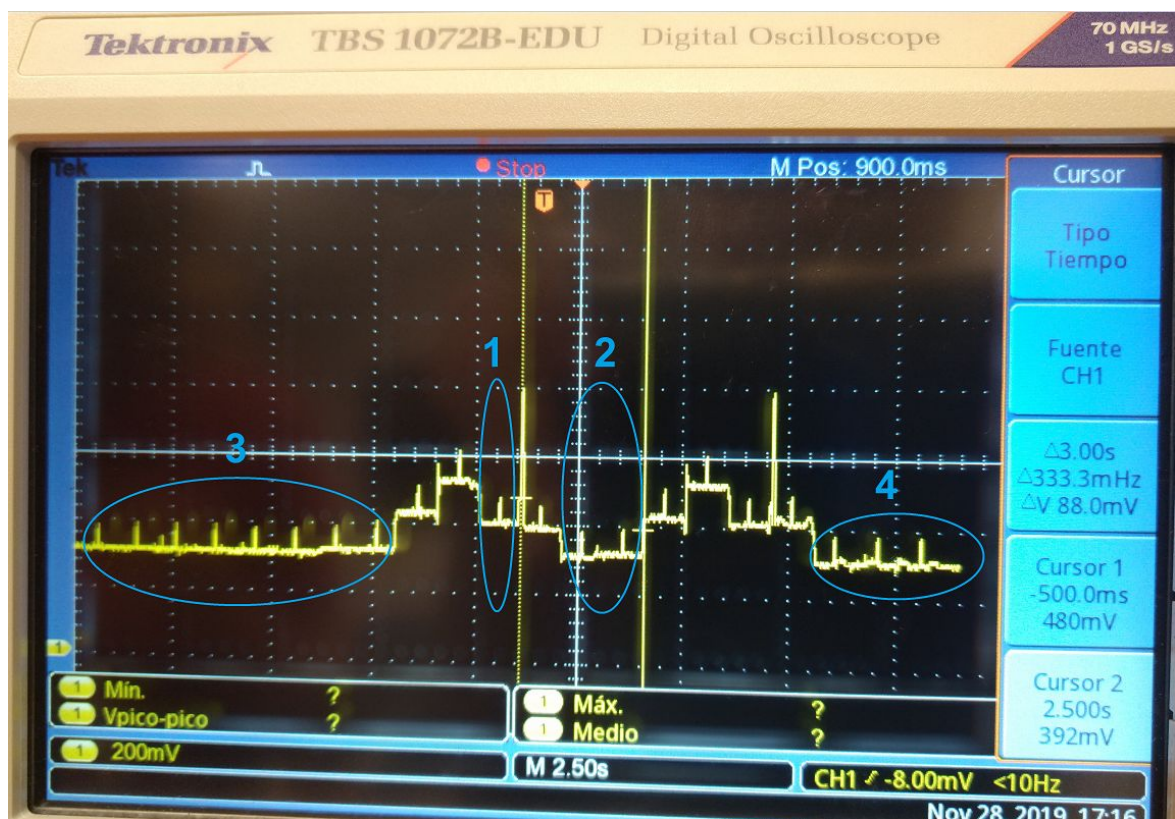


Figura 13. Tensión sobre la resistencia cuando el nodo entra en modo de sueño. El círculo 1 corresponde al espacio de descanso después de haber abierto las ventanas de recepción. El círculo 2 es el mismo espacio después de la ventana de transmisión. 3 y 4 muestran el QP.

La tensión para el primer círculo es de 400 mV y 320 mV para los círculos 2, 3 y 4. De esta forma, usando la ecuación 1, se obtiene que la corriente para el caso 1 es de 40 mA y la del resto es de 32 mA.

La Figura 14 es tomada de la documentación oficial del fabricante del radio utilizado por el Seeeduino, RHF76-052. En ella se puede ver la corriente esperada cuando está ejecutando LoRaWAN en un nodo clase A. La ventana de transmisión llega a tener una corriente aproximada de 35 mA, 12 mA para las ventanas de recepción y aproximadamente 1.45uA para cuando está dormido [38].

La Figura 14 sólo es utilizada para comparar el consumo de corriente de la implementación realizada con la información dada por el fabricante. En comparación con los obtenidos al implementar MACGSP6, los valores mostrados en la Figura 14 son menores. Esto se puede deber a que los valores de la Figura 14 solamente incluye al radio y no al resto de los dispositivos y funciones que se ejecutan en el módulo Seeeduino LoRaWAN. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que el código cargado envía constantemente información al puerto serial para poder monitorear el comportamiento de los nodos por medio de un computador.

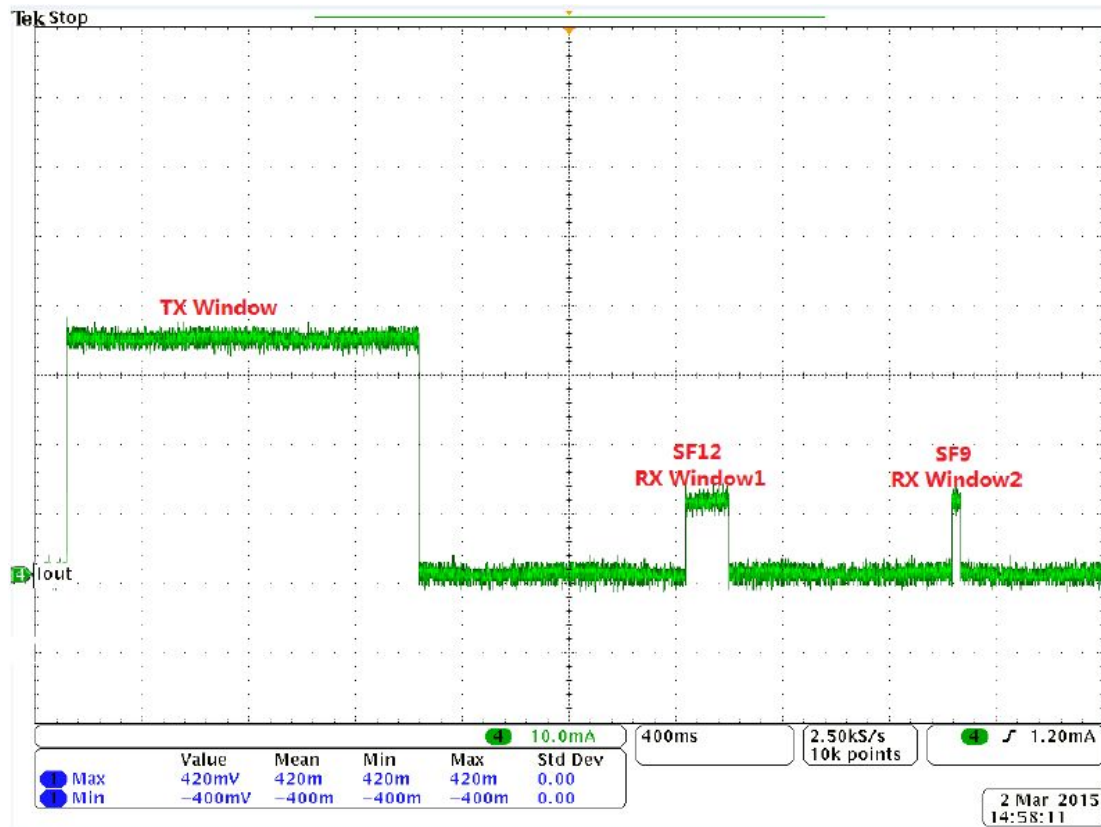


Figura 14. Corriente del módulo RHF76-052 con LoRaWAN, clase A SF12 [38].

Por otro lado, en [39] se muestran diferentes valores de corriente para distintas plataformas de WSN (Wireless Sensor Networks). En ellas, se hace referencia a tres modos de operación: Transmisión, recepción y dormido. La tabla 4 muestra estos valores, para poder compararlos con los valores obtenidos en el Seeeduino LoRa.

Plataforma	Corriente en cada modo (mA)		
	Tx	Rx	Dormir
Mica2(0 dBm)	21.34	14.99	4.3
MicaZ (0 dBm)	22-28	19.7	0.743-8
MC13224 (0 dBm)	29	22	3.3
T-MoteSky (0 dBm)	21.6	18.4	0.627
XbeeSeries1 (0 dBm)	45	50	<0.010
Seeeduino LoRa (10 dBm)	79.2	42-52	32-40

Tabla 4. Corrientes en diferentes modos para tecnologías de WSN (wireless sensors networks). Tomado de [39].

La Tabla 4 muestra que los resultados de corriente obtenidos en [39] con el nodo LoRa fueron mayores que el resto de nodos, especialmente cuando entra al modo dormido donde las plataformas de WSN muestran una corriente máxima de 4.3mA. El valor de la corriente en el modo de transmisión también es mayor en el Seeeduino, lo cual indica que la plataforma en la que se desarrolló consume más que otras plataformas presentadas en la literatura.

4.2 Pruebas de campo

En estas pruebas, en cada punto se usaron un computador portátil, un powerbank y un nodo LoRaWAN. Los powerbanks se utilizaron para mantener energizados los nodos, que en el momento en que estos pasan al QP, el consumo es de 32 mA, como se reportó en la sección anterior. Este consumo resulta ser muy bajo para el puerto USB y el computador deja de percibir que hay algún dispositivo conectado, apagando el puerto. Al hacer esto, el programa cargado en el nodo se reinicia y se requiere empezar las pruebas nuevamente.

Para sincronizar todo el funcionamiento de los nodos, se utilizó un nodo adicional que cumple la función de enviar una señal indicando el inicio de las pruebas. Esta señal se envía en modo P2P con 20 dBm de potencia y DR0 para lograr alcanzar todos los nodos de la red. Una vez los nodos reciben esta señal pasan a reconfigurar su tasa de transmisión a DR3 y se iniciaba el algoritmo de MACGSP6.

Cada prueba corresponde a un nodo configurado como transmisor, que envía 50 paquetes, mientras los demás nodos están programados como enrutadores y el nodo 1 como relevo, recibiendo los paquetes de la red y retransmitiéndolos al GW usando el procedimiento previsto por MACGSP6. La prueba por cada nodo tuvo una duración entre 45 y 50 minutos.

Los parámetros usados en la implementación de MACGSP6 son así:

GP = 3 segundos

Probabilidad de chisme, $p_{gsp} = 0.3$

Duración de ventana de recepción = 2 segundos

Espacio de descanso = 1 segundo

Tiempo de Quietud (1 QP) = $10 * 3$ segundos = 30 segundos.

DR = 3 (5470 bps [40]), SF = 8, CR (Code Rate) = 4/5

Potencia de Tx = 10dBm

Sensitividad del GW [41] = -125dBm

Sensitividad del nodo Seeeduino LoRaWAN [32] = -140dBm

El mensaje a enviar es de 10 bytes, formado por 3 secciones (Figura 15): contador de saltos (1 byte), cuerpo de mensaje (8 bytes), número de secuencia (1 byte). El cuerpo del mensaje se mantiene igual durante todas las pruebas. Por último el número de secuencia comienza desde 0 y termina en 31 en hexadecimal (49 decimal).

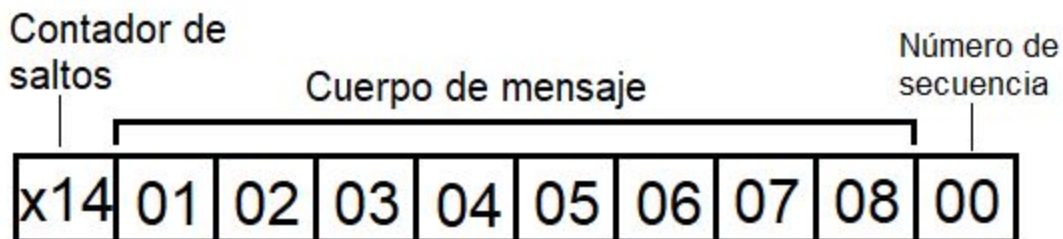


Figura 15. Mensaje a enviar. Cuenta con 3 partes: Contador de saltos, cuerpo de mensaje, número de secuencia (todos los valores se encuentran en hexadecimal).

Las pruebas fueron agrupadas por rondas donde cada uno de los nodos envió sus 50 paquetes como transmisor. El orden en que estos pasaban a ser transmisores fue escogido de forma aleatoria. En total se realizaron nueve rondas. Los resultados de los porcentajes de mensajes buenos recibidos en el GW se muestran en la Tabla 5. La ecuación 2 muestra la fórmula utilizada para calcular estos valores. Se considera un mensaje bueno aquel que esté formado como se muestra en la Figura 15. Los resultados muestran que PRR promedio aumentó de 0% a un mínimo de 61%.

$$\begin{aligned} \% \text{ Mensajes rx en GW} &= \text{Mensajes buenos rx en el GW} \div \text{Mensajes tx desde el nodo} \\ &= \text{Mensajes buenos rx en el GW} \div 50 \quad (2) \end{aligned}$$

Nodo Tx	Promedio de mensajes entregados por ronda (%)									Mensajes entregados			Promedio saltos
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Promedio (%)	Desv. Std.	Total	
2	82	66	62	82	68	78	72	62	76	72 ± 9.21	0.08	317	2.52
3	92	86	66	80	54	90	76	78	90	79 ± 14.63	0.13	356	2.50
4	68	64	50	76	70	62	68	48	60	63 ± 10.67	0.09	283	3.25
5	62	76	66	56	40	54	66	50	80	61 ± 14.67	0.13	275	3.29
6	80	54	90	68	74	92	88	80	82	79 ± 13.96	0.12	354	2.74

Tabla 5. Tabla resumen de resultados. promedio con intervalos de confianza de Bonferroni del 95%.

La Tabla 5 muestra los valores promedio del porcentaje de recepción de paquetes en el GW, con intervalos de confianza del 95% de Bonferroni para poder determinar si hay diferencias estadísticas entre los 5 nodos. Nótese que todos los nodos tienen al menos un intervalo de confianza que se cruza con alguno de los otros intervalos. Esto significa que no hay diferencias estadísticas con un 95% de confianza. Una posible razón para el porcentaje de mensajes recibidos en el nodo 5 es la cantidad de saltos por las que debe pasar un mensaje hasta el GW (en promedio 3.29 saltos). Como se puede ver en la Tabla 3, los enlaces entre el nodo 5 con sus nodos vecinos 2 y 3 son buenos, sin embargo según la Figura 16 este nodo fue el que menos mensajes con dos saltos pudo entregar.

Por otra parte, la Figura 16 muestra el número de saltos que realizaron los nodos. Se encontró que para los nodos 4 y 5 la mayoría de los mensajes entregados tuvieron 3 o más saltos, 235 (83%) para el nodo 4 y 264 (96%) para el nodo 5. La mayor cantidad obtenida fue de seis saltos desde los nodos 5 y 6. Con esto, se

corroborar el cumplimiento del primer alcance propuesto. Por otra parte la cantidad de saltos máxima (6 saltos) se traduce a un retardo de alrededor de 18 segundos.

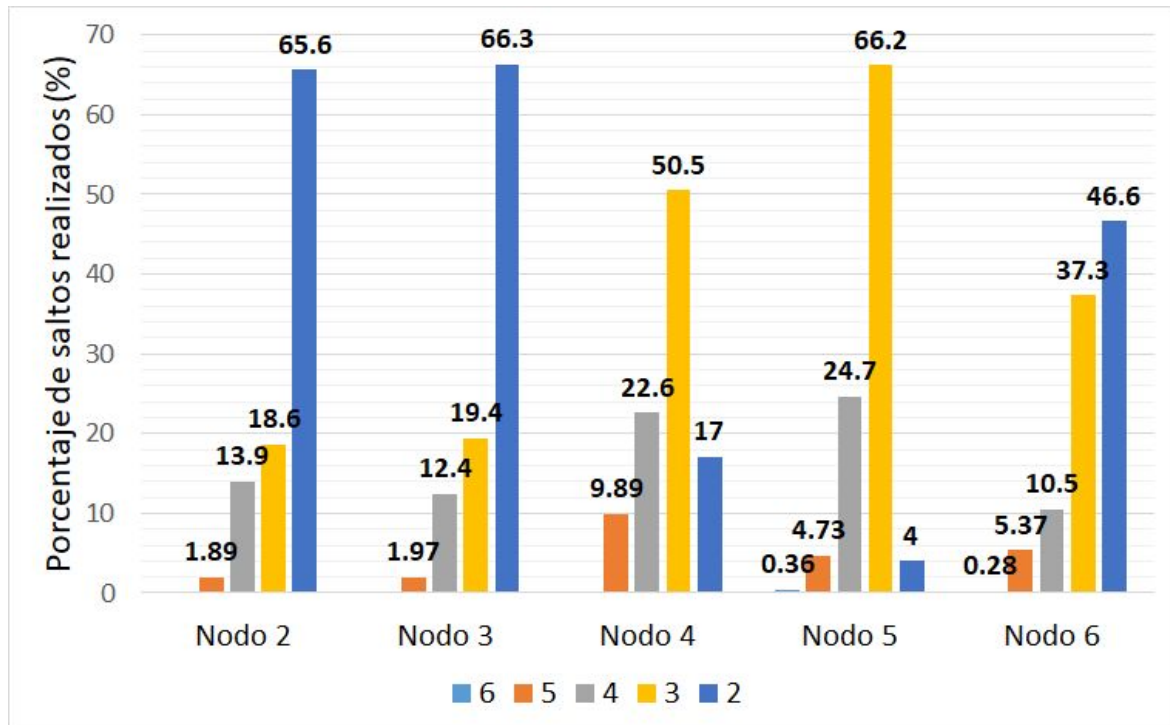


Figura 16. Saltos realizados por cada uno de los mensajes recibidos en el GW.

En la Figura 16 se observa que los nodos 4 y 5 pudieron transmitir directamente hasta el nodo 1 en más de una ocasión, ya que el total de saltos hasta el GW es 2 y el nodo 1 transmite en un salto hacia el GW. El porcentaje del total de mensajes entregados con dos saltos para el nodo 4 fue de 17% y para el nodo 5 fue de 4%. Esto muestra la robustez de la modulación LoRa, que logró recibir los paquetes aunque no hubiera línea de vista y de la existencia de enlaces malos o débiles que no fueron tenidos en cuenta en la Tabla 2 y Figura 10.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Como conclusiones del trabajo de investigación realizado se pueden recalcar los siguientes puntos:

- Si bien LoRaWAN no establece un protocolo de enrutamiento, utilizando alternativas como el modo P2P es posible implementar algoritmos que permitan enrutar los paquetes con la tecnología LoRa.
- La solución propuesta logró mitigar la pérdida de paquetes por ausencia de línea de vista, ya que la tasa de recepción pasó de 0% en LoRaWAN a mínimo 61% en MACGSP6, como se puede ver en la Tabla (5). La red implementada garantiza que los nodos no tienen línea de vista entre sí ni con el GW, con la excepción del nodo relevo quien tiene línea de vista con el GW.
- Se midió el consumo de corriente de un nodo LoRaWAN, el cual es superior a diversos nodos utilizados para WSN. Este resultado se puede deber a la plataforma utilizada (Seeeduino LoRaWAN) y al procesamiento de datos interno que se realiza por el código empleado.
- Se mostró que MACGSP6 con LoRa puede entregar mensajes a pesar de estar funcionando en un red con enlaces que no tienen línea de vista. Se mostró que LoRa puede lidiar con enlaces sin línea de vista en modo P2P, hasta llegar a un nodo destino, por medio de la ayuda de MACGSP6. El resultado concuerda con lo encontrado en [31], aunque la implementación presentada en este proyecto presenta menor porcentaje de paquetes recibidos.

Para trabajos futuros se recomienda optimizar el código de los nodos retransmisores para reducir el consumo innecesario de energía. Esto con el fin de

realizar pruebas para verificar el funcionamiento de la red con fuentes de energía independientes.

Otro desafío es el retardo en una red con múltiples saltos, el cual puede llegar a ser muy alto al implementar nodos LoRa debido a las bajas tasas de transmisión. Esto puede afectar negativamente el rendimiento de la red, afectando las aplicaciones.

Así mismo, se recomienda seguir trabajando con protocolos de enrutamiento para este tipo de soluciones, debido a los resultados positivos obtenidos en esta investigación. Finalmente, se recomienda verificar el funcionamiento de los protocolos con más de un nodo transmisor.

Bibliografía

- [1]. Semtech, "LoRa Modem Design Guide, rev.1," July 2013.
- [2]. F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN" in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, 2017. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613
- [3]. F. Orfei, C. Benedetta Mezzetti and F. Cottone, "Vibrations powered LoRa sensor: An electromechanical energy harvester working on a real bridge," 2016 IEEE SENSORS, Orlando, FL, 2016, pp. 1-3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808752
- [4]. A. M. Abu-Mahfouz, Y. Hamam, P. R. Page, and K. Djouani, "Real-time Dynamic Hydraulic Model for Potable Water Loss Reduction" , Procedia Eng., vol. 154, no. 7, pp. 99–106, 2016.
- [5]. F. Yang, G. S. Ramachandran, P. Lawrence, S. Michiels, W. Joosen and D. Hughes, "µPnP-WAN: Wide area plug and play sensing and actuation with LoRa," 2016 International SoC Design Conference (ISOCC), Jeju, 2016, pp. 225-226. doi: 10.1109/ISOCC.2016.7799869
- [6]. M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," in IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, October 2016. doi: 10.1109/MWC.2016.7721743.
- [7]. T. M. Workgroup, "A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN TM What is it?," no. November, 2015.
- [8]. L. Li, J. Ren and Q. Zhu, "On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System," 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), Jackson, WY, 2017, pp. 77-80. doi: 10.1109/WONS.2017.7888762
- [9]. H. C. Lee and K. H. Ke, "Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 67, no. 9, pp. 2177–2187, 2018.
- [10]. D. H. Kim, J. B. Park, J. H. Shin and J. D. Kim, "Design and implementation of object tracking system based on LoRa," 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN), Da Nang, 2017, pp. 463-467. doi: 10.1109/ICOIN.2017.7899535
- [11]. U. Raza, P. Kulkarni and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An

- Overview," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, 2017. doi: 10.1109/COMST.2017.2652320
- [12]. A. Kurtoglu, J. Carletta and K. S. Lee, "Energy consumption in long-range linear wireless sensor networks using LoRaWAN and ZigBee," 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Boston, MA, 2017, pp. 1163-1167. doi: 10.1109/MWSCAS.2017.8053135
- [13]. M. N. Ochoa, A. Guizar, M. Maman and A. Duda, "Evaluating LoRa energy efficiency for adaptive networks: From star to mesh topologies," 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Rome, 2017, pp. 1-8. doi: 10.1109/WiMOB.2017.8115793
- [14]. M. Jiménez, A. Medina, L. Navarro, A. Osorio, D. Robles, M. Calle, J. Candelo-Becerra., "Obstacles, Speed and Spreading Factor: Insights in LoRa Mobile Performance," Int. J. Commun. Antenna Propag., vol. 9, no. 3, pp. 228–235, 2019.
- [15]. LoRa Alliance Technical Committee, "LoRaWAN 1.1 Specification," LoRaWAN 1.1 Specif., no. 1.1, p. 101, 2017.
- [16]. D. Lundell, A. Hedberg, C. Nyberg and E. Fitzgerald, "A Routing Protocol for LoRa Mesh Networks," 2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM), Chania, 2018, pp. 14-19.
- [17]. S. Delbruel, N. Small, and D. Hughes, "FLIP : Federation support for Long range low power Internet of things Protocols." e-print arXiv, 2017.
- [18]. Y. Ben-Asher, M. Feldman, and S. Feldman, "Ad-hoc routing using virtual coordinates based on rooted trees," Proc. - IEEE Int. Conf. Sens. Networks, Ubiquitous, Trust. Comput., vol. 2006 II, pp. 6–13, 2006.
- [19]. B. Sartori, S. Thielemans, M. Bezunartea, A. Braeken and K. Steenhaut, "Enabling RPL multihop communications based on LoRa," 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Rome, 2017, pp. 1-8. doi: 10.1109/WiMOB.2017.8115756
- [20]. José Dias, António Grilo, "LoRaWAN multi-hop uplink extension", Procedia Computer Science, Volume 130, 2018, Pages 424-431, ISSN 1877-0509,
- [21]. M. Usmonov and F. Gregoretti, "Design and implementation of a LoRa based wireless control for drip irrigation systems," 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), Shanghai, 2017, pp. 248-253. doi: 10.1109/ICRAE.2017.8291389
- [22]. G. Zhu, C. Liao, T. Sakdejayont, I. Lai, Y. Narusue and H. Morikawa, "Improving the Capacity of a Mesh LoRa Network by Spreading-Factor-Based Network Clustering," in IEEE Access, vol. 7, pp. 21584-21596, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2898239
- [23]. C. Ebi, F. Schaltegger, A. Rüst and F. Blumensaat, "Synchronous LoRa mesh network to monitor processes in underground infrastructure," in IEEE Access. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913985
- [24]. A. Abrardo and A. Pozzebon, "A multi-hop lora linear sensor network for the

- monitoring of underground environments: The case of the medieval aqueducts in Siena, Italy,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 2, 2019.
- [25]. Bhardwaj, Ayush, and Aman Raj Singh Tomar. "LoRa WANET: MAC Protocol Design Approach." *Journal of Embedded System & Applications* 5.3, 19-25., 2018.
 - [26]. M. S. Tanaka, "Data gathering algorithm for children's observation system: For realizing real-time performance in information terminal bus stop," 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, 2018, pp. 1-2. doi: 10.1109/CCNC.2018.8319306
 - [27]. Oliveira Rabelo, Caio César. "Desenvolvimento de protocolo baseado em AODV usando camada física do LoRa.", *Trabalho de Conclusão de Curso*, 2018.
 - [28]. C. Liao, G. Zhu, D. Kuwabara, M. Suzuki and H. Morikawa, "Multi-Hop LoRa Networks Enabled by Concurrent Transmission," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21430-21446, 2017
 - [29]. Bor, M., Vidler, J. E., & Roedig, U." LoRa for the Internet of Things". *EWSN '16 Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, 2016
 - [30]. M. Calle, "Complementing the GSP routing protocol in wireless sensor networks. Doctoral Dissertation, School of Information Sciences," University of Pittsburgh. Ph. D., 2009.
 - [31]. Calle, M., Berdugo, G., Velez, J. C., and Kabara, J. "MACGSP6: A protocol for supporting internet of things applications with Non-Line-of-Sight links". *Computers & Electrical Engineering*, 2017, 58, 76-87
 - [32]. Seeed Technology Co, "Seeeduino LoRaWAN." [Online]. Available: http://wiki.seeedstudio.com/Seeeduino_LoRAWAN/. [Ingresado: 28-Nov-2019].
 - [33]. Seeed Technology Co, "LoRa/LoRaWAN Gateway Kit" [Online]. Available: http://wiki.seeedstudio.com/LoRa_LoRaWan_GW_Kit/. [Accessed: 28-Nov-2019].
 - [34]. Agencia Nacional del Espectro, "Cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencia 2014," pp. 1–375, 2014.
 - [35]. G. Berdugo, M. Buchelly, M. Calle, and J. C. Velez, "Testbed for evaluating wireless sensor networks with non-line of sight links," *Proc. Int. Symp. Wirel. Commun. Syst.*, pp. 136–140, 2012.]
 - [36]. R. Aguirre et al., "The grey area in wireless communications: A multiplatform experimental study," 2014 IEEE Latin-America Conf. Commun. IEEE LATINCOM 2014, pp. 0–5, 2014.
 - [37]. M. Calle and J. Kabara, "Measuring Energy Consumption in Wireless Sensor Networks Using GSP," *2006 IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Helsinki, 2006, pp. 1-5. doi: 10.1109/PIMRC.2006.254184
 - [38]. RisingHF, "RisingHF RHF-DS01500 RisingHF.", 2015
 - [39]. E. Chain, R. Sara, J. Arias, E. Escorcía, and M. Calle, "OTS-WSN: A Wireless Sensor Network implemented with off-the-shelf components," *IEEE Symp. Wirel. Technol. Appl. ISWTA*, pp. 327–332, 2013.

- [40]. Augustin, A.; Yi, J.; Clausen, T.; Townsley, W.M. "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things". *Sensors* 2016, 16, 1466.
- [41] RisingHF, "RisingHF DS01603 RisingHF," © 2016 RISINGHF - All rights Reserv., 2016.